青藏高原植被光能利用效率时空变化

其美拉姆[1,2]， 郑 诚[2]， 袁浏欢[2]， 吴沛桐[2]，
谭 凯[2]， 申乔天[2]， 史海静[3,4]

（1. 西藏拉萨市曲水县农业农村局，西藏 拉萨 850699；2. 西北农林科技大学草业与草原学院，陕西 杨凌 712100；3. 西北农林科技大学水土保持研究所，陕西 杨凌 712100；4. 中国科学院水土保持与生态环境研究中心，陕西 杨凌 712100）

摘 要：研究青藏高原植被光能利用效率（Light Use Efficiency，LUE）时空变化特征对确定陆地生态系统碳汇和未来功能维持具有重要的生态价值和现实意义。本研究利用1982—2018年GLASS数据以及气候数据，采用趋势分析和偏相关分析方法，探究了青藏高原植被光能利用效率年际动态变化特征及其与温度、降雨、饱和水汽压差（Vapor Pressure Deficit，VPD）和太阳辐射的关系。结果表明：（1）1982—2018年，青藏高原植被生态系统LUE总体上呈显著线性增长趋势，增长速率为$3.16×10^{-3}$ g C·MJ^{-1}·a^{-1}。（2）青藏高原植被生态系统LUE空间分布具有较强的异质性，表现为由西向东递增的空间分布格局。由趋势分析结果可知，中部和东北部地区LUE年际增长趋势明显。（3）相较降水和VPD等因子，温度与植被LUE年际变化的关系更为密切。本研究成果能够为揭示青藏高原植被生态系统对气候变化的响应提供依据。

关键词：植被；光能利用效率；气候因子；时空动态；青藏高原

青藏高原是世界上最大、最高的高原，其独特的地理位置和特殊的地形气候条件使其成为全球生态系统中的关键区域[1]。植被作为青藏高原生态系统的重要组成部分，在维持青藏高原生态平衡、水源涵养和碳循环等方面发挥着不可替代的作用[2]。然而，近年来，随着全球气候变化加剧，青藏高原植被生态系统面临着前所未有的压力[3]。光能作为主要能量来源，对植被生长和生态系统功能的发挥至关重要。植被光能利用效率的时空变化已成为当前生态学和气象学研究的热点问题之一。光能利用效率（Light Use Efficiency，LUE）是表征植物利用太阳能同化CO_2的效能[4]。了解青藏高原植被LUE的时空变化趋势及其驱动因素，有助于深刻理解青藏高原生态系统对气候变化的响应机制，为科学合理地生态保护和可持续利用提供科学依据。

近年来，有关光能利用效率的研究在国内外得到了广泛关注，涉及多个领域，包括植物生态学[5]、农业科学[6]和环境科学等。Wang等[7]将涡度协方差通量数据与MODIS植物冠层光合有效辐射比例结合起来，估算了内蒙古典型草原和荒漠草原的LUE；Huang等[8]利用2003—2007年中国不同生态系统6个站点的涡度协方差通量资料，研究了云度指数（Cloud Index，CI）指示的扩散辐射对植被和森林生态系统LUE的影响；Yuan等[9]基于总初级生产力（Gross Primary Productivity，GPP）、光合有效辐射数据和太阳辐射数据绘制了1982—2018年中国北方植被的LUE时空分布格局；徐铭泽等[10]采用Li-6400便携式光合仪定期测量了油蒿生长季叶片LUE的季节动态及相关叶性状指标，探究了叶性状对LUE的影响；钱钊晖等[11]利用常绿阔叶林光化学植被指数（Photochemical Reflectance Index，PRI）、归一化植被指数（Normalized Difference Vegetation Index，NDVI）、增强型植被指数（Enhanced Vegetation Index，EVI）和优化比值植被指数（Modified Simple Ratio，MSR）构建了多元回归模型，估算了亚热带常绿林光能利用效率，结果表明这种回归模型可以提

收稿日期：2024-02-21； **修订日期**：2024-07-09
基金项目：国家自然科学基金项目（41501055）；国家科技基础条件平台建设项目（2005DKA2300）
作者简介：其美拉姆（1992-），女，畜牧师，主要研究方向为牧草逆境与草地修复. E-mail: 1051927567@qq.com
通讯作者：郑诚. E-mail: zhengcheng@nwafu.edu.cn

升LUE估测精度。

近年来，随着全球干旱的加剧，植被生态系统的生产力将发生剧烈变化[12]，尤其是生态环境相对脆弱敏感的青藏高原[13-14]，未来碳汇功能是否持续上升存在很大的不确定性。LUE作为估算碳汇的重要参数，可以用来描述植被功能特性和生理过程，并反映植被生态系统的碳汇能力。因此，揭示植被LUE的年际动态及其气候驱动因素，对于准确评价和预测草地生态系统未来的碳汇能力和潜力至关重要。本研究以青藏高原植被生态系统作为研究对象，使用1982—2018年的遥感数据对植被LUE的时空变化进行分析，揭示气候变化对青藏高原生态系统的影响，促进对青藏高原生态系统可持续发展的深入理解。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

青藏高原是世界上海拔最高，面积最大的地理单元，平均海拔高于4000 m，有着“世界屋脊”和世界“第三极”的称号[1]。面积约为2.57×10^6 km^2，地理范围介于73.45°~104.7°E、25.95°~39.85°N之间，包括整个西藏和青海，以及新疆、甘肃、四川和云南部分地区[15]。青藏高原气温较低，年平均温度在-15~10 ℃之间。降水较少，年平均降水量约为375.87 mm，通常集中在6—9月[16]。此外，青藏高原太阳辐射强烈，日照时间长，年太阳辐射量在5000~8500 MJ·m^{-2}之间，年日照时数为2500~3200 h之间。植被类型以草地和高寒草甸为主，植被覆盖度从东南向西北呈递减变化趋势。

1.2 数据来源与处理

1.2.1 *遥感数据* 本文采用了一种多源数据融合的方法来计算陆地生态系统的LUE。为了得到LUE值，本文综合使用了GPP、光合有效辐射（Photosynthetically Active Radiation，PAR）以及光合作用有效辐射吸收比例（Fraction of absorbed Photosynthetically Active Radiation，FPAR）三种数据类型。选用了GLASS（Global Land Surface Satellite）数据库提供的GPP和FPAR数据。这些数据的特点是它们拥有0.05°的高空间分辨率和8 d的时间分辨率，覆盖了从1982—2018年的长时间序列，提供了关于全球尺度植被生产力变化的宝贵信息。GLASS数据库是公认的高质量数据源，可通过其网站（http://www.glass.umd.edu/）获取。同时，利用了MERRA-2（Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2）提供的PAR数据。这些数据的空间分辨率为0.5°×0.625°，时间分辨率为每天，时间跨度从1980—2020年。MERRA-2是由NASA全球模型和数据同化办公室提供的一个重分析产品，其数据可以从对应的网站（https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/data_access/）获得。此外，本研究通过双线性插值的方法使不同空间分辨率的数据达到统一。GPP、PAR以及FPAR均以年为单位进行累计计算，使来源不同的数据具有相同的空间和时间分辨率。

1.2.2 *气候数据* 气候数据包括1982—2018年的温度（Temperature）、降水（Precipitation）、水汽压（Vapor Pressure）和太阳辐射（Solar Radiation，SR）数据。所有的气象数据均来源于CRU and National Centre for Environmental Prediction（CRUNCEP）V9.0数据集产品（https://vesg.ipsl.upmc.fr/thredds/catalog/work/p529 viov/cruncep/V9_1901_2020/catalog.html），其空间分辨率为0.5°，时间分辨率为6 h。该数据集是CRU月气候学和6 h NCEP再分析气象数据的组合，涵盖了1901年至今的气候数据。

饱和水汽压差（Vapor Pressure Deficit，VPD）由实际水汽压（Actual Vapor Pressure，AVP）与温度数据计算得到[17-18]：

$$\mathrm{VPD} = \mathrm{SVP} - \mathrm{AVP} \tag{1}$$

$$\mathrm{SVP} = 0.6112 \times e^{\frac{16.67 \times T}{T + 243.5}} \tag{2}$$

式中：SVP为饱和水汽压（kPa）；AVP为实际水汽压（kPa）；T为温度（℃）。

1.3 研究方法

1.3.1 *植被LUE计算方法* 植被LUE可通过逐像元计算年度GPP总值和植被吸收光合有效辐射（Absorbed Photosynthetic Active Radiation，APAR）总值的比值得到[19]，计算公式如下：

$$\mathrm{LUE} = \frac{\mathrm{AGPP}}{\mathrm{APAR}} = \frac{\mathrm{AGPP}}{\mathrm{PAR} \times \mathrm{FPAR}} \tag{3}$$

式中：AGPP为年总初级生产力（g C·m^{-2}）；APAR为植被吸收的光合有效辐射（MJ·m^{-2}）；PAR为光合有效辐射（MJ·m^{-2}）；FPAR为光合有效辐射吸收比。

1.3.2 *趋势分析* 1982—2018年LUE的变化趋势利用一元线性回归法分析，趋势线斜率（β）表示年际

变率[20-21]，计算公式如下：

$$Y = \alpha + \beta \times X + \varepsilon \tag{4}$$

式中：Y为各年的LUE；X为时间序列；α为截距；ε为残差；β为斜率，计算公式为：

$$\beta = \frac{n \times \sum_{j=1}^{n}(j \times Y_j) - \sum_{j=1}^{n} j \sum_{j=1}^{n} Y_j}{n \times \sum_{j=1}^{n} j^2 - \left(\sum_{j=1}^{n} j\right)^2} \tag{5}$$

式中：Y_j表示第j年的LUE；n为年数；$\beta>0$表示LUE（或者气候因子）时间序列呈现上升趋势，$\beta<0$表示LUE时间序列呈现下降趋势，利用t检验对β进行显著性检验，通过95%置信水平表示趋势显著。

1.3.3　偏相关分析　以年LUE为因变量，年平均温度、年降水量、年总辐射和年平均VPD为自变量，进行偏相关分析，以一阶偏相关系数为例，计算公式如下：

$$r_{XY \cdot Z} = \frac{r_{XY} - r_{XZ} \times r_{YZ}}{\sqrt{1 - r_{XZ}^2}\sqrt{1 - r_{YZ}^2}} \tag{6}$$

式中：$r_{XY \cdot Z}$为去除Z因素影响后Y与X因素的偏相关系数。同理，r_{YZ}、r_{XZ}为下标所示的两个相关因素之间的相关系数。n阶偏相关系数的计算类似，并利用t检验对偏相关系数进行显著性检验，通过95%置信水平表示趋势显著。

各驱动变量的相对作用：本研究基于栅格尺度，给出长时间序列的多变量的相对重要性计算，并输出每个栅格最重要的变量，采用的方法是多元回归，然后对回归系数进行标准化，取标准化回归系数绝对值最大的那个变量作为该栅格影响因变量的最重要变量。

2　结果与分析

2.1　青藏高原LUE年际变化

1982—2018年青藏高原年均LUE整体呈波动上升趋势（图1），增长速率为3.16×10^{-3} g C·MJ^{-1}·a^{-1}。37 a间波动范围为0.57~0.72 g C·MJ^{-1}。2013年为这一时段的最大值，1997年的LUE显著下降，呈现近年来最小值，多年LUE平均值为0.623 g C·MJ^{-1}。2012年后增长趋势放缓并开始有下降趋势。

2.2　LUE空间分布特征

采用1982—2018年的LUE数据对青藏高原近37 a的平均LUE进行计算，结果如图2所示。青藏高原LUE分布具有显著的空间异质性。总体均值为0.62，多数区域LUE处于0~0.9之间，占研究区总面积的68%。LUE在青藏高原的空间分布具有明显的地理分区，东南部LUE值偏大，中西部偏小（图2）。

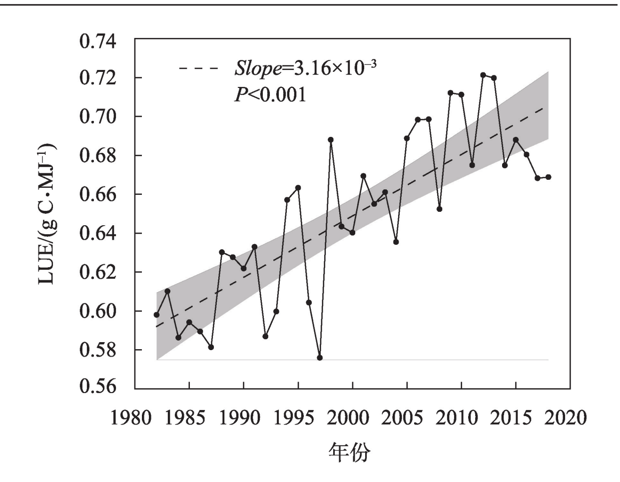


图1　青藏高原植被生态系统LUE年际变化

Fig. 1　Interannual changes in LUE of the Qinghai-Xizang Plateau vegetation ecosystem

LUE的年际动态变化在1982—1990年、1991—2000年和2001—2010年均具有明显的空间异质性。如图3所示，在1982—2000年间，青藏高原中部和东北部的植被LUE变化范围为0~0.075 g C·MJ^{-1}·a^{-1}（>0），表明年际间变化呈增长趋势；2001—2010年，青藏高原中部和南部的植被年际间变化值为0~0.05 g C·MJ^{-1}·a^{-1}，表明这一时段年际间LUE呈增长趋势；相较于1982—2010年，在2011—2018年，LUE年际动态值变化减小，大面积区域LUE年际动态值<0，表明LUE年际动态呈负增长趋势。此外，从图3色带变化的空间分布来看，相较于1982—2010年间，2011—2018年空间异质性减弱（图3d）。

2.3　LUE变化与气象因素相关分析

本研究利用温度、降水、VPD和太阳辐射数据与LUE变化进行了偏相关关系分析，以相关系数作为LUE变化的驱动因子测试。由图4、图5可知，不同影响因子对LUE空间年际动态的解释力差异明显，各影响因子解释力大小为：温度（64%）、降雨（12%）、太阳辐射（12%）和VPD（12%）。如图4所示，温度在青藏高原36.7%的区域对LUE年际动态都有积极的影响，只有1.8%的区域有负作用；而降水则影响研究区15.4%的区域，正相关占8.8%，负相关占6.6%；VPD和太阳辐射对LUE年际动态的影响

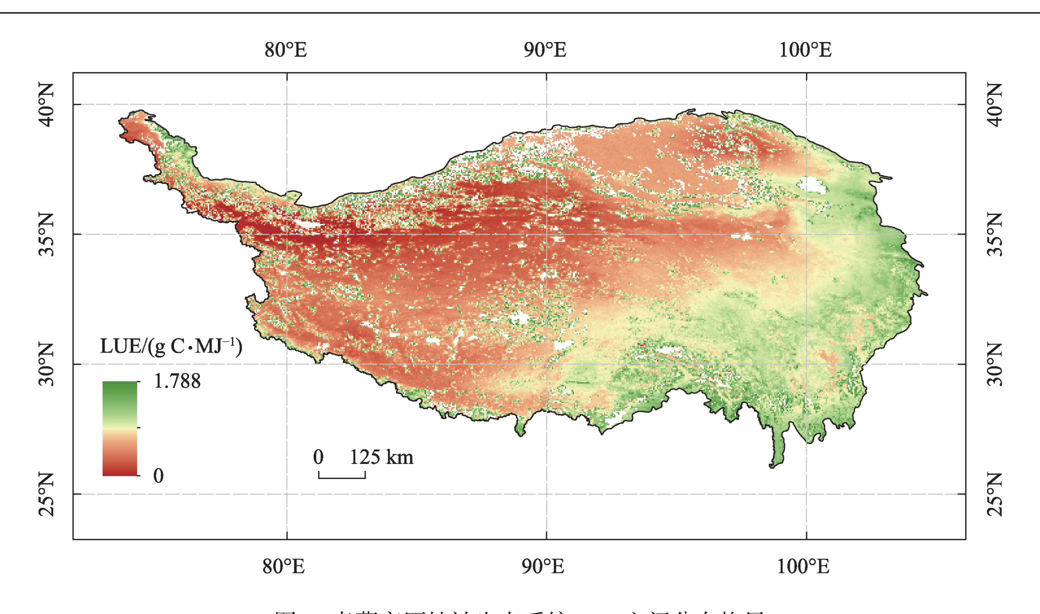


图2 青藏高原植被生态系统LUE空间分布格局

Fig. 2 Spatial distribution pattern of LUE in the Qinghai-Xizang Plateau vegetation ecosystem

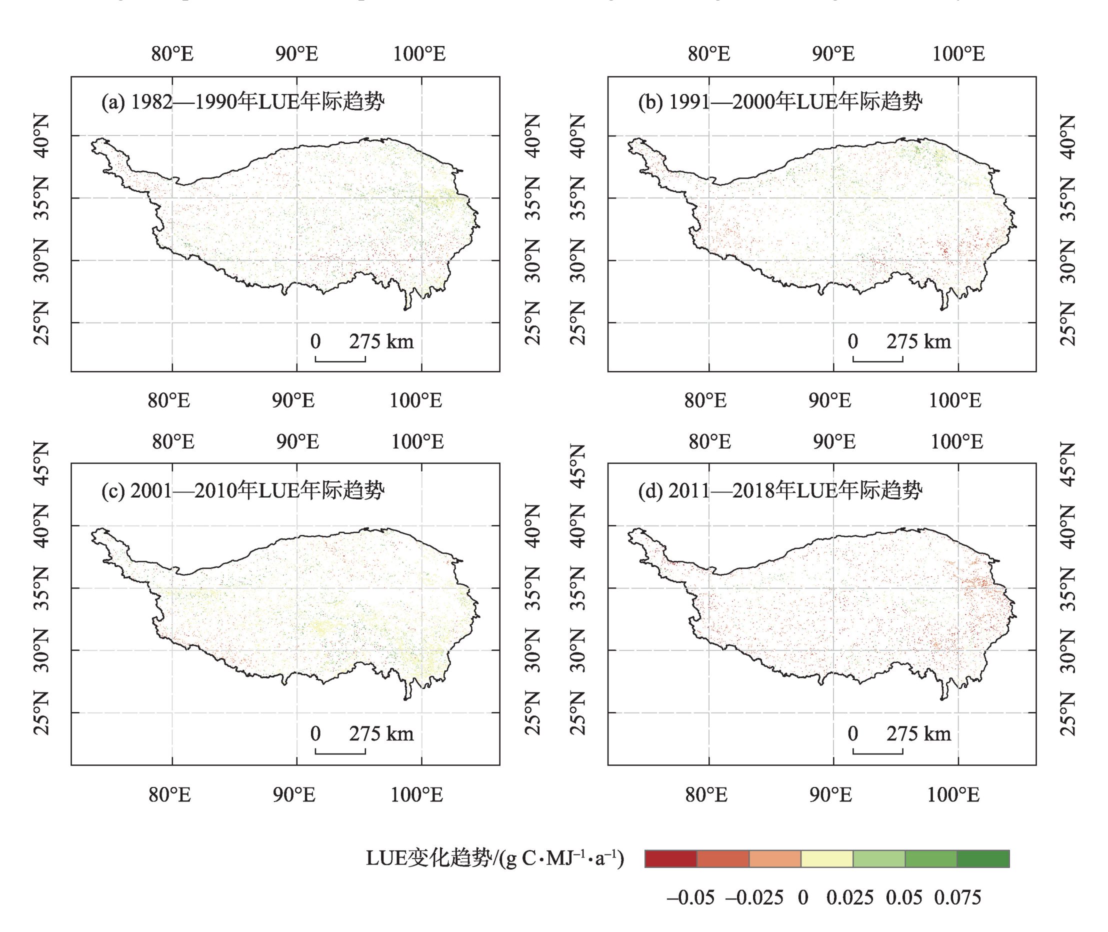


图3 青藏高原植被生态系统LUE年际动态变化特征

Fig. 3 Interannual dynamic variation characteristics of LUE in the Qinghai-Xizang Plateau vegetation ecosystem

较弱，分别占研究区的13.5%和14.7%。本研究基于偏相关分析结果进一步探究了不同驱动因素对青藏高原LUE年际动态变化的相对贡献。从分析结果来看，温度对青藏高原LUE年际动态变化的相对贡献占比64%，降雨、太阳辐射和VPD均为12%（图5）。总体而言，青藏高原温度对LUE年际动态变化的解释力最强。

温度对青藏高原大部分地区的LUE有显著影

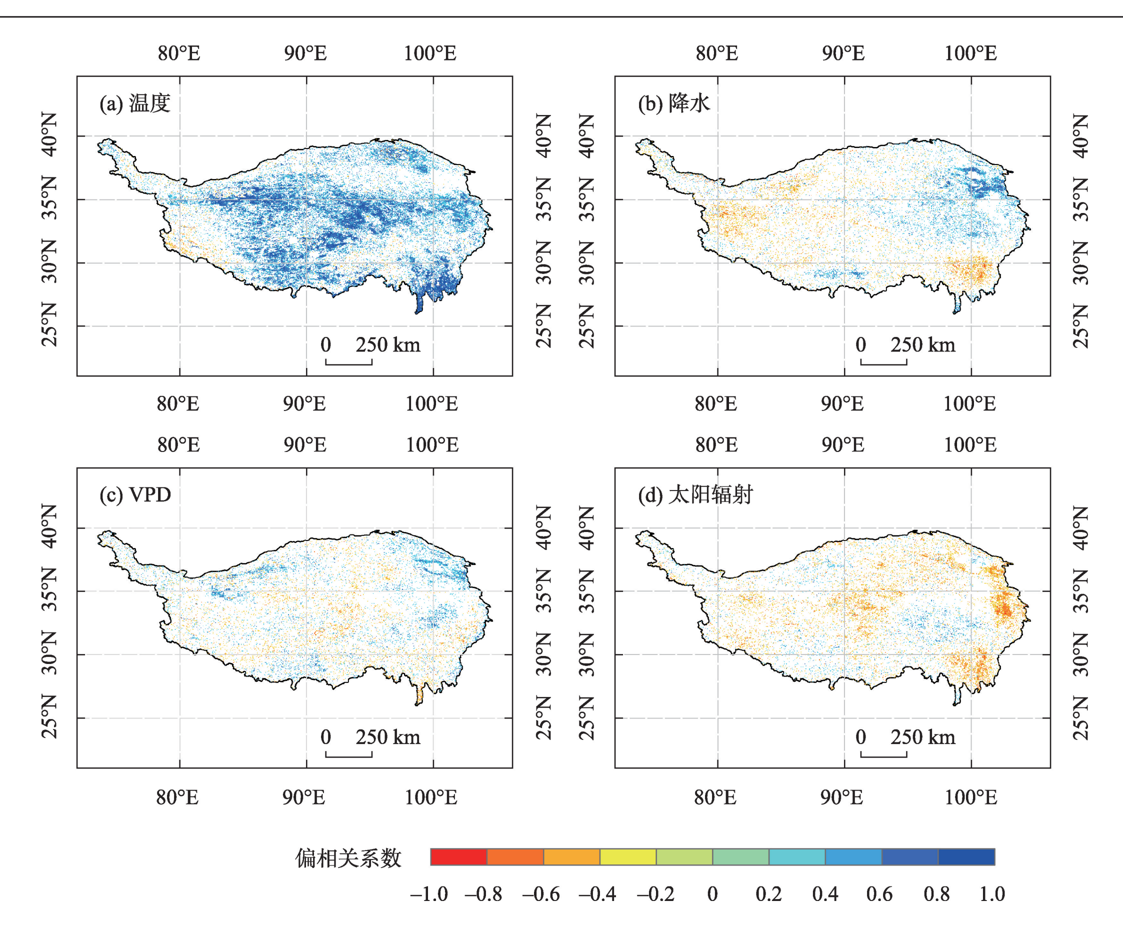


图4　植被生态系统LUE与温度、降水、VPD和太阳辐射的偏相关系数

Fig. 4　Partial correlation coefficients between LUE and temperature, precipitation, VPD and solar radiation

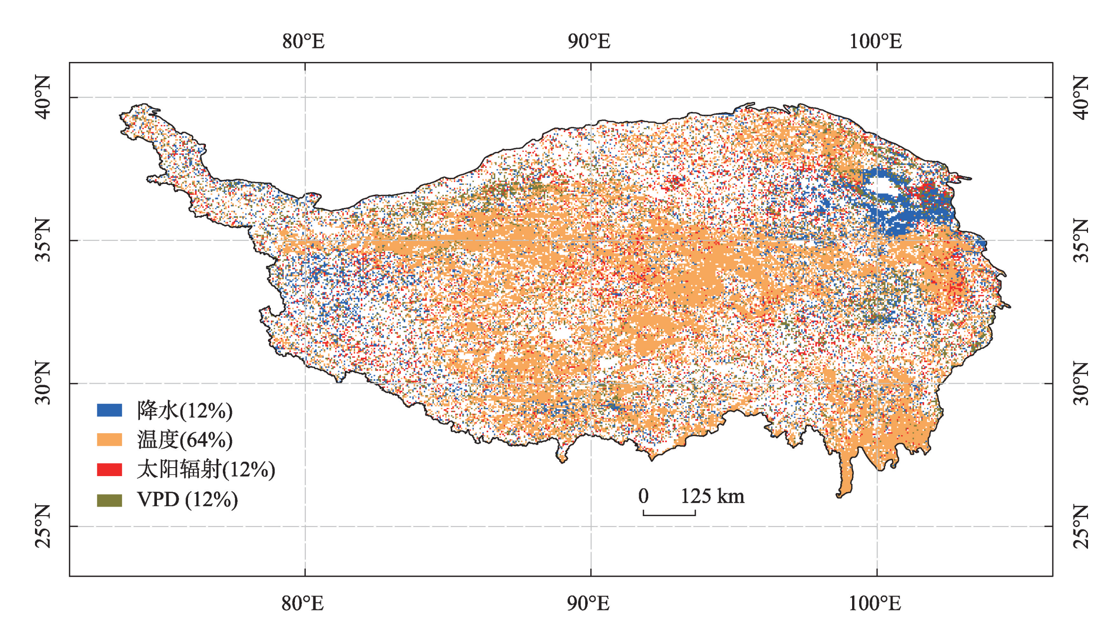


图5　温度、降水、VPD和太阳辐射对植被LUE的相对作用

Fig. 5　Relative effects of temperature, precipitation, VPD and solar radiation on vegetation LUE

响。具体表现为随着年均温的升高,青藏高原大部分地区LUE呈增长趋势,尤其是青藏高原中部和南部地区;而青藏高原西南部LUE则随着年均温的升高,LUE降低(图5)。

3 讨 论

3.1 青藏高原植被生态系统LUE时空分布格局

探究青藏高原LUE时空分布特征及气候驱动因素对于研究青藏高原植被生态系统功能具有重要意义,同时也是研究生态系统碳水平衡的关键。年际动态变化研究结果显示,青藏高原植被生态系统LUE呈逐年波动增长趋势(图1),表明在过去的37 a间,青藏高原植被生长状态在逐步改善,这一结果可能与气候变暖和植被管理措施有关。近年来,青藏高原升温显著[22],曹晓云等[23]的研究表明,近60 a来青藏高原受气候变化影响,高原植被净初级生产力整体呈显著增长趋势。本文的研究结果与前人的研究具有一致的变化趋势,均呈现波动增长趋势。此外,本文的研究还发现,2012年后增长趋势放缓并开始有下降趋势,主要原因可能与全球气候变化有关,如降水模式的变化、温度波动以及极端天气事件的频发都会导致植被生长速度下降[24-25]。

空间上,青藏高原LUE呈东部高、中部和西部偏低的空间格局,这一结果与NPP和水利用效率空间格局较为一致[26-27]。出现这一空间分布趋势的主要原因是气候因子空间分布格局对植被生态过程的影响造成的。青藏高原东南部受太平洋季风影响,降水充沛,植被覆盖度较高,LUE相应较高。藏北高原地区海拔高、气温低,植被多为高寒草甸,覆盖度较低,LUE较低。阿里地区气温偏低,降水稀少,荒漠化严重,LUE较低。此外,1982—2018年,青藏高原中部和西部LUE动态变化趋势呈增长趋势,与国家颁布实施的退耕还林还草政策有关,2004年之后,植被LUE总体上波动变缓。另外,近年来,青藏高原气温和降水均呈上升状态,暖湿化效应对青藏高原生态植被的生长发育和恢复均有积极的影响,进而导致LUE的增长趋势[28]。

3.2 青藏高原气候因子对植被LUE的影响

青藏高原生态系统LUE受气候因子影响显著,具体来说,与温度呈正相关的面积占研究区面积的36.7%,与太阳辐射呈负相关的比例为11.3%,与降水和VPD呈正负相关的面积比例均未达10%,表明青藏高原植被生态系统LUE受气温和太阳辐射影响较大(图4、图5)。有研究表明,温度是影响青藏高原植被LUE年际变化的主要因素[25,29-30]。本研究发现温度影响了青藏高原64%的LUE年际变化,主要原因是青藏高原海拔普遍较高,气温偏低,植被本身又对温度变化较为敏感。具体来说,温度影响植物的光合作用进而关系到植物个体的生长发育。随着温度的升高,植被光合作用迅速增强,加之该区温差较大,促进有机物积累,进而改变植被光能利用效率。降水空间差异也会影响植物生物量的积累,影响植被生态系统LUE,尤其是青藏高原东北部地区(三江源地区)[31]。青藏高原东北部地区平均海拔超过4000 m,处于内陆腹地,受两大洋暖湿气流影响较弱,降雨稀少,水资源成为影响植被生长的关键因素之一[32]。从空间分布来看,降水主要影响青藏高原东北部地区LUE年际动态变化(图5)。这与东北部地区的地势和气候有关[33]。VPD是指在一定温度下,饱和水汽压与空气中的实际水汽压之间的差值,它表示的是实际空气距离水汽饱和状态的程度,即空气的干燥程度。在青藏高原地区很多区域植被LUE与VPD正相关,主要分布在研究区北部草甸草原,这与其他生态系统结果不一致[31],可能原因是青藏高原大气整体较为干燥,且这部分地区植被类型多为高寒草甸依赖大气中水分生长。太阳辐射对LUE年际动态的影响区域较为分散,这可能与地形因子和云量有关[34]。综上所述,气候因子影响青藏高原植被的LUE时空动态,不同因子间具有差异性。相比于降水、VPD和太阳辐射,温度作为驱动青藏高原LUE变化的重要环境因子,在气候变化越来越频繁的环境背景下[22],尤其在青藏高原关注温度与LUE的动态变化过程将越来越重要。

本研究初步揭示了青藏高原植被生态系统的LUE时空变化特征,对青藏高原植被生态系统功能维持具有重要意义。受植被特征数据、环境数据及人类干扰数据[35]等方面的限制,研究采用的数据集较为陈旧,但本研究着重趋势分析,对以后青藏高原植被光能利用效率研究具有参考价值。未来可以从以下几方面进行改进:(1) 增加植被类型分类数据,分析各植被类型生态系统的光能利用效率时空变化规律,进一步揭示青藏高原植被生态系统功能维持机理。(2) 获取人类活动干扰数据和地形数据,揭示青藏高原植被生态系统光能利用效率时空变化特征。

4 结 论

本研究通过趋势分析和偏相关分析等方法探讨了青藏高原1982—2018年植被生态系统LUE时空变化特征及其驱动因子,主要结论如下:

(1) 1982—2018年,青藏高原植被生态系统LUE总体呈上升趋势,年增长速率为3.16×10^{-3} g C·MJ^{-1},线性增长趋势显著(P<0.001)。

(2) 青藏高原植被生态系统LUE分布具有较强的空间异质性,表现为由西向东递增的空间趋势。由趋势分析结果可知,中部和东北部地区LUE年际增长趋势明显。

(3) LUE与气候因子的相关性结果显示,青藏高原大部分地区LUE与温度呈正相关,LUE年际动态对温度变化的响应更敏感。

参考文献(References):

[1] Qiu Jane. The third pole[J]. Nature, 2008, 454: 393-396.

[2] 王军, 张骁, 高岩. 青藏高原植被动态与环境因子相互关系的研究现状与展望[J]. 地学前缘, 2021, 28(4): 70-82. [Wang Jun, Zhang Xiao, Gao Yan. The relationships betwen vegetation dynamics and environmental factors on the Qinghai-Tibet Plateau: A review of research progres and prospect[J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(4): 70-82.]

[3] An Shuai, Chen Xiaoqiu, Zhang Xiaoyang, et al. Precipitation and minimum temperature are primary climatic controls of alpine grassland autumn phenology on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Remote Sensing, 2020, 12(3): 431.

[4] Pei Yanyan, Dong Jinwei, Zhang Yao, et al. Evolution of light use efficiency models: Improvement, uncertainties, and implications [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2022, 317: 108905.

[5] 方浩玲, 程先富, 秦丽. 安徽省植被净初级生产力估算——基于改进的CASA模型[J]. 生态学报, 2024, 44(4): 1601-1612. [Fang Haoling, Cheng Xianfu, Qin Li. Estimation of net primary productivity of vegetation in Anhui Province based on improved CASA Model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(4): 1601-1612.]

[6] 郭建茂, 郭彩云, 李羚, 等. 基于地面通量观测与MODIS数据估算玉米光能利用率[J]. 气象科学, 2023, 43(2): 186-195. [Guo Jianmao, Guo Caiyun, Li Ling, et al. Retrieval of light use efficiency of maize based on surface flux observation and MODIS data[J]. Journal of the Meteorological Science, 2023, 43(2): 186-195.]

[7] Wang Yu , Zhou Guangsheng. Light use efficiency over two temperate steppes in Inner Mongolia, China[J]. Plos One, 2012, 7(8): e43614.

[8] Huang Kun, Wang Shaoqiang, Zhou Lei, et al. Impacts of diffuse radiation on light use efficiency across terrestrial ecosystems based on eddy covariance observation in China[J]. Plos One, 2014, 9(11): e110988.

[9] Yuan Liuhuan, Zhang Tianyou, Yao Hongbin, et al. Altered trends in light use efficiency of grassland ecosystem in Northern China [J]. Remote Sensing, 2023, 15: 5275.

[10] 徐铭泽, 刘鹏, 田赟, 等. 毛乌素沙地油蒿叶性状对光能利用效率动态的影响[J]. 生态学报, 2023, 43(12): 5122-5136. [Xu Mingzhe, Liu Peng, Tian Yun, et al. Seasonal response of light use efficiency of *Artemisia ordosica* to leaf traits in Mu Us sandy land[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(12): 5122-5136.]

[11] 钱钊晖, 王绍强, 周国逸, 等. 冠层结构对亚热带常绿林光能利用效率估算的影响[J]. 自然资源学报, 2019, 34(3): 613-623. [Qian Zhaohui, Wang Shaoqiang, Zhou Guoyi, et al. Assessing canopy structure effect on the estimation of light-use efficiency in a subtropical evergreen forest[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(3): 613-623.]

[12] Gao Dexin, Wang Shuai, Wang Lixin, et al. Enhanced coupling of light use efficiency and water use efficiency in arid and semi-arid environments[J]. Ecohydrology, 2022, 15(5): e2391.

[13] 唐可欣, 郭建斌, 何亮, 等. 中国旱区GPP时空演变特征及影响因素研究[J].干旱区研究, 2024, 41(6): 964-973. [Tang Kexin, Guo Jianbin, He Liang, et al. Characteristics of the spatial and temporal evolution of Gross Primary Productivity and its influencing factors in China's drylands[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(6): 964-973.]

[14] 山建安, 朱睿, 尹振良, 等. 基于CMIP6模式的中国西北地区干旱时空变化[J]. 干旱区研究, 2024, 41(5): 717-729. [Shan Jianan, Zhu Rui, Yin Zhengliang, et al. Spatial and temporal variation of drought in Northwest China based on CMIP6 model[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(5): 717-729.]

[15] Li Lanhui, Zhang Yili, Wu Jianshuang, et al. Increasing sensitivity of alpine grasslands to climate variability along an elevational gradient on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2019, 678: 21-29.

[16] 王雪莹, 谷黄河, 代斌, 等. 不同水平分辨率区域气候模式对青藏高原气候特征模拟[J]. 干旱区研究, 2024, 41(3): 363-374. [Wang Xueying, Gu Huanghe, Dai Bin, et al. Simulation of climate characteristics in the Qinghai-Tibet Plateau by regional climate models at different horizontal resolutions[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(3): 363-374.]

[17] Yuan Wenping, Zheng Yi, Piao Shilong, et al. Increased atmospheric vapor pressure deficit reduces global vegetation growth[J]. Science Advances, 2019, 5(8): 1396.

[18] Zhang Tianyou, Chen Zhi, Zhang Weikang, et al. Long-term trend and interannual variability of precipitation-use efficiency in eurasian grasslands[J]. Ecological Indicators, 2021, 130: 108091.

[19] 朱先进, 于贵瑞, 何洪林, 等. 2002—2010年中国典型生态系统辐射及光能利用效率数据集[J]. 中国科学数据: 中英文网络

版, 2019, 4(1): 97−109. [Zhu Xianjin, Yu Guirui, He Honglin, et al. Radiation and light-use efficiency dataset of typical Chinese ecosystems (2002−2010) [J]. Science Data Bank, 2019, 4(1): 97−109.]

[20] 康雄, 曹俊涛, 陈成, 等. 不同趋势法的宁夏长时序植被变化分析[J]. 测绘通报, 2020(11): 23−27. [Kang Xiong, Cao Juntao, Cheng Cheng, et al. Analysis of long-term vegetation change in Ningxia with different trend methods[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2020(11): 23−27.]

[21] 曲学斌, 王彦平, 高绍鑫, 等. 2000—2020年呼伦贝尔地区归一化植被指数时空变化及其对气候的响应[J]. 气象与环境学报, 2022, 38(5): 57−63. [Qu Xuebin, Wang Yanping, Gao Shaoxin, et al. Temporal and spatial change of NDVI and its response to climatic conditions in Hulun Buir region from 2000 to 2020[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2022, 38(5): 57 −63.]

[22] Piao Shilong, Chen Mengdi, Chen Anping, et al. Altitude and temperature dependence of change in the spring vegetation green-up date from 1982 to 2006 in the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151: 1599−1608.

[23] 曹晓云, 周秉荣, 周华坤, 等. 气候变化对青藏高原植被生态系统的影响研究进展[J]. 干旱气象, 2022, 40(6): 1068−1080. [Cao Xiaoyun, Zhou Binrong, Zhou Huakun, et al. Research progress on the impact of climate change on vegetation ecosystem in the Tibetan Plateau[J]. Journal of Arid Meteorology, 2022, 40(6): 1068−1080.]

[24] Shen Miaogen, Piao Shilong, Jeong Sujong, et al. Evaporative cooling over the Tibetan Plateau induced by vegetation growth[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2015, 112(30): 9299−9304.

[25] Piao Shilong, Wang Xuhui, Park Taejin, et al. Characteristics, drivers and feedbacks of global greening[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2020, 1: 14−27.

[26] 同琳静, 刘洋洋, 王倩, 等. 青藏高原植被降水利用效率时空动态及对气候变化的响应[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(5): 226−234. [Tong Linjing, Liu Yangyang, Wang Qian, et al. Spatial-temporal dynamics of precipitation use efficiency in grassland and its elationship with climate changes on Qinghai-Tibet Plateau[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(5): 226−234.]

[27] 陈舒婷, 郭兵, 杨飞, 等. 2000—2015年青藏高原植被NPP时空变化格局及其对气候变化的响应[J]. 自然资源学报, 2020, 35(10): 2511−2527. [Chen Shuting, Guo Bin, Yang Fei, et al. Spatial and temporal patterns of NPP and its response to climate change in the Qinghai-Tibet Plateau from 2000 to 2015[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(10): 2511−2527.]

[28] Liu Jiafeng, Lu Yaqing. How well do CMIP6 models simulate the greening of the Tibetan Plateau?[J]. Remote Sensing, 2022, 14(18): 4633.

[29] Fei Xuehui, Song Qinghai, Zhang Yiping, et al. Patterns and controls of light use efficiency in four contrasting forest ecosystems in Yunnan, Southwest China[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2019, 124(2): 293−311.

[30] 王鸿艺, 汪东川, 王思润, 等. 青藏高原不同季节植被NPP空间分异的定量归因[J]. 水土保持学报, 2023, 37(3): 225−232. [Wang Hongyi, Wang Dongchuan, Wang Sirun, et al. Quantitative attribution of spatial variability of NPP in different seasons of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Soiland Water Conservation, 2023, 37(3): 225−232.]

[31] 王志鹏, 张宪洲, 何永涛, 等. 降水变化对藏北高寒草原化草甸降水利用效率及地上生产力的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(6): 1822−1828. [Wang Zhipeng, Zhang Xianzhou, He Yongtao, et al. Effects of precipitation changes on the precipitation use efficiency and aboveground productivity of alpine steppe-meadow on northern Tibetan Plateau, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(6): 1822−1828.]

[32] 邓彤彤, 周国英, 肖元明, 等. 长期降水变化和氮添加对青藏高原高寒草原物种多样性和生产力的影响[J]. 草地学报, 2024, 32(5): 1448−1458. [Deng Tongtong, Zhou Guoying, Xiao Yuanming, et al. Effects of long-term precipitation changes and nitrogen addition on species diversity and productivity of alpine grasslands in the Qinghai Tibet Plateau[J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(5): 1448−1458.]

[33] 管琪卉, 丁明军, 张华敏. 青藏地区高寒草地春季物候时空变化及其对气候变化的响应[J]. 山地学报, 2019, 37(5): 639−648. [Guan Qihui, Ding Mingjun, Zhang Huamin. Spatiotemporal variation of spring phenology in alpine grassland and response to climate changes on the Qinghai-Tibet, China[J]. Mountain Research, 2019, 37(5): 639−648.]

[34] 范灵悦, 马晓燕, 赵剑琦. 近几十年青藏高原与华北地区地表太阳辐射变化特征及其影响因素的对比分析[J]. 气象科学, 2024(2): 254−266. [Fan Lingyue, Ma Xiaoyan, Zhao Jianqi. A comparative analysis of surface solar radiation change and its influencing factors during past few decades over Tibetan Plateau and North China[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2024, 44(2): 254−266.]

[35] 王金兰, 王小军, 刘文辉, 等. 不同放牧方式对高寒草甸植物群落关键种的影响[J]. 生态学报, 2024, 44(15): 1−11. [Wang Jinlan, Wang Xiaojun, Liu Wenhui, et al. Effects of different grazing regime on the keystone species of plant community in alpine meadow[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(15): 1−11.]

Spatial-temporal dynamics of vegetation light use efficiency and its driving factors on the Qinghai-Xizang Plateau

QIMEI Lamu[1,2], ZHENG Cheng[2], YUAN Liuhuan[2], WU Peitong[2],
TAN Kai[2], SHEN Qiaotian[2], SHI Haijing[3,4]

(1. Agriculture and Rural Affairs Bureau of Qushui County, Lhasa 850699, Xizang, China; 2. College of Grassland Agriculture, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; 4. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: Investigating the spatial-temporal variation characteristics of vegetation light-use efficiency on the Qinghai- Xizang Plateau has important ecological value and practical significance for determining the carbon sink and future function maintenance of terrestrial ecosystems. This study was conducted to explore the interannual dynamic variation characteristics of vegetation light-use efficiency on the Qinghai-Xizang Plateau and its relationship with temperature, rainfall, VPD, and solar radiation using GLASS data and climate data from 1982 to 2018 and trend analysis and partial correlation analysis methods. Results showed that (1) From 1982 to 2018, the LUE of the Qinghai-Xizang Plateau vegetation ecosystem generally exhibited a significant linear growth trend, with a growth rate of 3.16×10^{-3} g C·MJ^{-1}·a^{-1}. (2) The spatial distribution of LUE in the Qinghai-Xizang Plateau vegetation ecosystem had strong spatial heterogeneity, exhibiting an increasing spatial trend from west to east. The trend analysis revealed an obvious interannual growth trend of LUE in the central and northeastern regions. (3) Temperature was more closely related to interannual changes in the LUE of vegetation than factors such as precipitation and VPD. This study provides a basis for revealing the response of the Qinghai-Xizang Plateau vegetation ecosystem to climate change.

Keywords: vegetation; light use efficiency; climate factors; spatiotemporal dynamics; Qinghai-Xizang Plateau